

УДК 621.317.799.2

В.Г. ЖИТАРЮК<sup>a</sup>, В.М. ГОДОВАНЮК<sup>a</sup>, ДОКТОРОВИЧ І.В.<sup>b</sup>

## ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРИЙМАЧІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ВИГОТОВЛЕНИХ НА ІОННО ТРАВЛЕНИХ ПОВЕРХНЯХ КРЕМНІЮ

<sup>a</sup> *Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича,  
вул. Коцюбинського, 2, 58012, м. Чернівці, Україна*

<sup>b</sup> *ВАТ «ЦКБ Ритм»,  
вул. Головна, 244, 58032, м. Чернівці, Україна*

**Анотація.** В роботі досліджується вплив іонного травлення поверхонь пластин кремнію на основні параметри фотодіодів, виготовлених на цих поверхнях.

**Аннотация.** Исследуется влияние ионного травления поверхностей кремния на основные параметры фотодиодов, изготовленных на этих поверхностях.

**Abstract.** Influence of ion etching of surfaces of silicon plates on the principal parameters of photodiodes made on these surfaces is investigated.

**Ключові слова:** фотоелектричний приймач, кремній, параметри поверхні, іонне травлення, оптичне випромінювання.

### ВСТУП

Незважаючи на те, що наявність деформованої кристалічної структури в приповерхневій зоні механічно полірованої поверхні відомо давно, досліджень впливу цього фактору на фотоелектричні властивості приймачів оптичного випромінювання, виготовлених на цих поверхнях, нами не виявлено. Поясненням цьому може бути те, що в класичних технологіях зняття деформованого шару здійснюється хіміко-механічним поліруванням (ХМП), використання якого вважається достатнім для зняття деформованого шару. Але, як показали спеціальні дослідження, при ХМП мінімізується силова дія на поверхню, але не ліквідується. Одночасно, при ХМП відбувається дія на поверхню хімічних реагентів, що змінює фізичні властивості поверхонь, підготовлених до формування активної зони приймачів.

Дієвим прийомом, в якому відсутня механічна дія та дія реагентів на поверхню, є травлення поверхонь кристалів у вакуумі низько температурною плазмою. До цього прийому дослідники поновили свою увагу у бумі досліджень наноструктур [1]. Результатом такої обробки є досягнення двох ефектів. Перший. Усувається приповерхневий шар кристалу, первісна структура якого зруйнована механічною обробкою поверхні. Другий. Усувається хімічно модифікований приповерхневий шар, утворений дією реагентів, що змінює фізичні властивості поверхонь кристалів, підготовлених до формування активної зони приймачів.

Цінність кінцевих експериментальних результатів суттєво залежить від якості приготування поверхні. Ідеально гладка і хімічно чиста поверхня представляє собою атомну площину, заповнену відповідними атомами згідно структури та стехіометрії ідеального кристалу. Очевидно, що таку поверхню не можна отримати в ідеальному вигляді, можливо лише до деякої степені наблизитись до такого стану. Фактична поверхня складається із набору випадкових по формі ділянок паралельних площин поверхневої ґратки, зміщених вертикально одне відносно одного на одну або декілька міжплощинних відстаней [2]. На границях цих плоских ділянок решіткових площин містяться атомні виступи, які називаються терасами. У виступах можуть зустрічатись ніші.

Найбільш суттєвою формою хімічної недосконалості поверхні є її забруднення домішками. Домішкові атоми можуть розміщуватись регулярним чином або хаотично у поверхневій площині ґратки, в точках над нею або дещо нижче. Зміна хімічного складу відбувається внаслідок окислювально-відновлювальних реакцій дій рідин, що подаються в зону обробки поверхонь при хіміко-механічному поліруванні, а також при нагріві кристалів при легуванні.

При використанні іонного травлення можливе пошкодження поверхні кристалу, яке усувається спонтанно помірним підвищенням температури поверхні впродовж деякого часу шляхом припинення охолодження пластини. Переважно цикл “бомбардування іонами і відпал” необхідно повторювати неодноразово до досягнення необхідної гладкості поверхні [3].

Таким чином, додаткова обробка поверхні іонним травленням після хіміко-механічного полірування забезпечує утворення як атомарно чистої поверхні, так і поверхні з відсутнім деформованим приповерхневим шаром. Зазначимо, що товщина деформованого шару, згідно [4], не перевищує  $500 \text{ \AA}$ . Разом з цим, у [2] указується, що ця товщина при ретельних технологічних процесах має порядок  $100\text{--}200 \text{ \AA}$ .

Оксидно-деформований шар викликати подвійну негативну дію на якість фотоприймачів. По-перше, глибина проникнення легуючих атомів для утворення фоточутливого шару незначна і за даними не перевищує  $1 \text{ мкм}$ , тобто не увесь легований шар прийматиме участь у фотогенерації носіїв, понизиться квантовий вихід процесу. Отже, зруйнований приповерхневий шар не буде детектором випромінювання. По-друге, при проходженні випромінювання, що підлягає реєстрації, через пошкоджений шар до фото активної зони кристалу, спостерігаються значні втрати через поглинання в цьому шарі, так як відомо, що подрібнена структура володіє значно вищим поглинанням, ніж кристалічна.

## 2. ПОСТАНОВКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Суть технологічних та дослідницьких процедур полягав у наступному. Підготовлені за класичною схемою три пластини кремнію  $\varnothing 70 \text{ мм}$  розрізались навпіл. Одна частина цих пластин виступала в якості контрольної серії (К), а інші половини – дослідної (Д). Екземпляри дослідної серії розміщувались на столику (катод), який охолоджувався рідким азотом, і підлягали обробці локалізованим тліючим розрядом у вакуумі.

Далі, на обох серіях одночасно у виробничих умовах були виготовлені напівпровідникові фотоелектричні приймачі випромінювання та проведені дослідження основних параметрів та характеристик.

Планування робіт та обробка поверхонь полірованих поверхонь пластин кристалічного кремнію низькотемпературною плазмою у атмосфері аргону проводилась на кафедрі оптики і спектроскопії ЧНУ, а виготовлення та дослідження проведені структурами „ЦКБ Ритм”, м. Чернівці.

## 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОПРИЙМАЧІВ

### 3.1. ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

*Нелінійність.* Для вимірювання нелінійності в межах динамічного діапазону фотоприймачів використовується метод додаткового світла, шляхом додавання двох потоків. Оптична схема являє собою два канали, в кожному з яких розміщені: джерело випромінювання – лампа розжарювання; оптична система – світлосильний фотооб'єктив; ослаблювач оптичного потоку – касета або турель з світлофільтрами та непрозорий екран. Світлові потоки різняться між собою (при однакових світлофільтрах в кожному каналі) не більше як на 10%, а їх рівень змінюють в межах від значення порогового потоку чутливості фотоприймача  $\Phi_{\text{п}}$  до максимального  $\Phi_{\text{max}}$ , причому,  $\Phi_{\text{max}} = 1 \cdot 10^8 \cdot \Phi_{\text{п}}$ .

Таблиця 1.

Результати вимірювання нелінійності енергетичної характеристики

№ пластини, серія	Нелінійність енергетичної характеристики, %								
	$\Phi_{\text{пор}} \times$	1	$10^1$	$10^2$	$10^3$	$10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$
1	КС	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	2,8
	ДС	0,05	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	1,0
2	КС	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,5	1,0	2,2
	ДС	0,05	0,1	0,05	0,2	0,2	0,3	0,5	0,8
3	КС	0,1	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,6	3,2
	ДС	0,05	0,05	0,1	0,1	0,3	0,4	0,6	1,0

Дані досліджень подані в таблиці 1. Як бачимо, фотоприймачі, що виготовлені на іонно-травлених поверхнях, виявляють істотне поліпшення лінійності динамічної характеристики.

*Динамічний діапазон.* Дослідження подані в табл. 2. За стандартами, інтервал динамічного діапазону встановлений в межах 20-ти відсоткового відхилення енергетичної характеристики від лінійності

Тут таки знову спостерігаємо кращі результати для приймачів, робочі поверхні яких підлягали травленню тліючим розрядом.

Покращення лінійності енергетичної характеристики та величини динамічного діапазону пояснюється так. Виходимо з того, що поверхневий деформований шар практично не приймає участі у фотоелектричних перетвореннях, але електричні контакти формують саме на його поверхні. Отже, він виступатиме в якості деякого буферного прошарку між електродом та фото чутливим шаром, який матиме кінцеву величину електричної ємності. Остання і є причиною погіршення лінійності енергетичної характеристики та зменшення динамічного діапазону, так як відомо, що умови проходження заряду через конденсатор залежать від величини його заряду.

*Інтегральна струмова чутливість* (табл. 2). Базовим елементом установки вимірювань є фотометрична лава. Джерелом випромінювання виступає фотометрична лампа розжарювання з кольоровою температурою 2856 K, що пройшла метрологічну атестацію на потужність світлового випромінювання

Таблиця 2.

Результати вимірювання динамічного діапазону та інтегральної струмової чутливості

№ пластины, серія	Динамічний діапазон, раз		Струмова чутливість, А/лк	
	КС	ДС	КС	ДС
1	$6,3 \cdot 10^7$	$2,1 \cdot 10^8$	$4,7 \cdot 10^{-8}$	$6,5 \cdot 10^{-8}$
2	$8,4 \cdot 10^7$	$6,2 \cdot 10^8$	$4,5 \cdot 10^{-8}$	$6,0 \cdot 10^{-8}$
3	$5,3 \cdot 10^7$	$4,1 \cdot 10^8$	$4,6 \cdot 10^{-8}$	$6,9 \cdot 10^{-8}$

Проведемо аналіз отриманих результатів. Всі три об'єкти виявляють чутливість, яка перевищує чутливість контрольної серії майже у півтора рази. Поясненням цього можуть бути два фактори. Перший. Зменшуються втрати випромінювання при його проходженні до активної фоточутливої зони внаслідок відсутності деформованого та окисленого приповерхневого шару. Другий. Зросла товщина фотоактивного шару, так як глибина проникнення атомів легування однакова як при наявності деформованого шару, так і при його відсутності.

### 3.2. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМНОВОГО СТРУМУ ФОТОПРИЙМАЧІВ

Як відомо, темновий струм фотоприймача – той, що тече через фотоприймач при заданій напрузі на ньому і відсутності потоку випромінювання. За нормативними документами „ЦКБ Ритм”, умови вимірювання такі: робоча напруга на фото діоді  $U_{роб} = 5 \text{ В}$ , температура фото діода  $t = 25^\circ \text{C}$ .

Результати вимірювання наведені в таблиці 3. Поверхня №1 - обробці розрядом підлягала тильна поверхня, тоді як робоча лежала на поверхні анода. Поверхня № 2 – робоча, на якій формується фото-активна зона яка обернена до катоду.

Таблиця 3.

Результати вимірювання темнового струму

№ пластины, серія	Темновий струм, А			
	Поверхня № 1 (тильна)		Поверхня № 2 (робоча)	
	КС	ДС	КС	ДС
1	$7,6 \cdot 10^{-9}$	$8,3 \cdot 10^{-9}$	$7,7 \cdot 10^{-9}$	$2,1 \cdot 10^{-9} \text{ А}$
2	$8,0 \cdot 10^{-9} \text{ А}$	$8,9 \cdot 10^{-9} \text{ А}$	$8,1 \cdot 10^{-9} \text{ А}$	$1,5 \cdot 10^{-9} \text{ А}$
3	$7,8 \cdot 10^{-9} \text{ А}$	$8,5 \cdot 10^{-9} \text{ А}$	$7,9 \cdot 10^{-9} \text{ А}$	$2,1 \cdot 10^{-9} \text{ А}$

Пояснимо результати. При бомбардуванні пластини іонами відбувається накопичення позитивних зарядів на поверхні і пластина опиняється в сильному електричному полі, утвореному цим поверхневим зарядом та анодом. Це поле спричиняє перенос з поверхні аноду атомів алюмінію, тобто металу. При прикладанні напруги живлення до фото діоду (5 В) вказані атоми будуть джерелом вільних

електронів, так як вони знаходяться на робочій поверхні приймача. Це і спричиняє зростання темнового струму.

Інакша ситуація складається при травленні робочої поверхні (поверхня 2). Забруднений деформований шар також є джерелом вільних носіїв зарядів. Якщо цей шар усунути іонним травленням, то буде також усунене додаткове джерело вільних носіїв струму, в результаті чого зменшиться і темновий струм. Бачимо, що це зменшення суттєве – у 3,5 – 5 разів.

### ВИСНОВКИ

Іонне травлення деформованого механічною обробкою робочих поверхонь пластин кремнію як матриць фотоприймачів випромінювання зумовлює:

- зростання інтегральної чутливості приймачів, виготовлених за новою технологічною схемою, в середньому в 1,4 рази;
- розширенню динамічного діапазону – близько одного порядку;
- зменшення темнового струму приблизно в чотири рази.

Дані результати викликають потребу теоретичного аналізу явищ та процесів, що відбуваються в ході обробки поверхонь з одного боку, а з іншого – аналіз стану зонної структури, яка викликає такі зміни в параметрах та характеристиках фотоприймачів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Алферов Ж. И. Физика и будущее полупроводниковых гетероструктур / Ж. И. Алферов // Физика и техника полупроводников. - №1, 1998, Т. 32. - С. 3 -18.
2. Bechstedt F., Enderlein R. Semiconductor Surfaces and Interfaces / F. Bechstedt, R. Enderlein. - Berlin: Akademie - Verlag, 1988. - 488 p.
3. Zangwill A. Physics at surfaces / A. Zangwill. - Cambridge: Cambridge University Press, 1988. - 536 p.
4. Приборы полупроводниковые. Микросхемы интегральные. // Руководящие материалы РМ 11.050.024-77 – 11.050.029-77. – М.: Изд-тво стандартов, 1977. - 56 с.

Надійшла до редакції 20.10.2008р.

**ЖИТАРЮК В. Г.** - кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри оптики і спектроскопії інженерно-технічного факультету Чернівецького національного університету ім. Юрія Федьковича, Чернівці, Україна. E-mail: Kozakov@itf.cv.ua

**ГОДОВАНЮК В. М.** - доктор технічних наук, професор, директор ВАТ „Центральне конструкторське бюро Ритм”, Чернівці, Україна.

**ДОКТОРОВИЧ І. В.** - інженер-дослідник „Центральне конструкторське бюро Ритм”, Чернівці, Україна.